



Max Charvolen : la dualité mathématique du travail des bords

René Lozi

► To cite this version:

René Lozi. Max Charvolen : la dualité mathématique du travail des bords. Jacqueline Chénieux-Gendron. Spatialisation en art et sciences humaines, Peeters, pp.225-253, 2004, Collection critique Pleine Marge. hal-00278257

HAL Id: hal-00278257

<https://hal.science/hal-00278257>

Submitted on 9 May 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Spatialisation en art et sciences humaines, sous la direction de Marcin Sobieszczanski, avec la collaboration de Céline Lacroix, Collection critique Pleine Marge dirigée par Jacqueline Chénieux-Gendron, Peeters, 2004, p. 225-253.

RENÉ LOZI

Max Charvolen : la dualité mathématique du travail des bords

Sans l'intelligence de Raphaël Monticelli à provoquer des rencontres improbables, sans son insistance à mettre en branle une tectonique des paradigmes, je ne pense pas que j'aurais eu un jour la chance de rencontrer l'œuvre de Max Charvolen, ni d'en discuter avec l'artiste lui-même. Peut-être au détour d'une exposition aurais-je été interpellé par ses « états de lieux » mais sans me sentir autorisé à dire ou écrire ce qu'un mathématicien au sein de son moi intime peut rouler comme étranges pensées. La magie de Raphaël est d'arriver à faire croire à chacun que son avis est pertinent, qu'il peut apporter aux autres un éclairage nouveau voire original et que tous ces éclairages croisés illuminent une œuvre. Laissons la magie opérer et prions le lecteur occasionnel de cet article d'excuser son auteur de s'être laissé prendre sous un charme que la faconde et l'amitié enrobent.

1. Charvolen et la mathématique

Pourquoi la mathématique ?

Il ne semble pas qu'il soit possible à première vue de trouver un rapport entre les mathématiques et l'œuvre de Max Charvolen. Il y a bien sûr la coopération de Charvolen avec Loïc Pottier¹ sur la recherche de toutes les mises à plat d'un volume à partir de quelques contraintes (inciser certaines arêtes mais pas l'intérieur d'un plan, ne pas détacher un élément de l'ensemble...) mais on peut toujours feindre de croire que le travail informatique n'est pas précédé d'une recherche mathématique, ou que l'algorithmique des programmes informatiques n'a pas recours à la géométrie, ou enfin qu'une mécanique de génération de mises à plat n'a pas de pouvoir explicatif².

L'homme de la rue, voire l'intellectuel (si ce vocable a un sens) prête aux mathématiciens le noir dessein de « capturer le monde » de le réduire à quelques formules, d'en expliquer la rationalité. C'est méconnaître les mathématiques dont les outils dérisoires ne permettent d'envisager la compréhension de modèles physiques que s'ils sont simplifiés à l'extrême ; c'est bien connaître quelques mathématiciens qui vivent dans un monde peuplé d'équations, de courbes et de chiffres, loin, très loin de la réalité tangible et encore plus de l'art qui fait appel à la dualité réalité-sensibilité.

Face aux « portulans » de Charvolen, la Mathématique semble impuissante. De surcroît que pourrait elle apporter à l'artiste ? Et, suprême raison d'ignorer l'œuvre de l'artiste pour le mathématicien pur : que pourrait apporter celle-ci à la Mathématique ?

Et cependant, comme les protons d'un atome que leur charge électrique repousse lorsqu'ils sont éloignés, mais que la *force nucléaire forte* attire lorsqu'on les rapproche assez, la mathématique et l'œuvre de Charvolen, qui semblent se repousser lorsqu'on les met côte à côte, ont des liens d'une solidité insoupçonnée dès qu'on les oblige à se questionner mutuellement.

¹ L. Pottier, *Les portulans de l'immédiat*, « Mise à plat d'un polyèdre », Marseille, éd. Al Dante, 1977, sous la direction de Raphaël Monticelli, p. 95-99.

² M. Charvolen, R. Monticelli, *Vertiges d'une chaise*, éd. Epiar-Cnap, Ministère de la culture, 1997, voir la dernière sérigraphie composée de 720 mises à plat (le nombre de mises à plat pour une chaise est supérieur à celui des particules de l'univers).

Le rapport entre la mathématique et l'œuvre de Charvolen doit être examiné dans l'aller-retour que je viens d'indiquer : que peut apporter la mathématique à celle-ci, qu'apporte-t-elle à la mathématique ?

Je suis intimement persuadé que l'analyse mathématique peut mettre en exergue une unité sous-jacente de l'œuvre sur une période plus importante que l'artiste ne l'imagine lui-même, de ses débuts vers les années 1967-68³ aux années 2000⁴, en dégagant deux problématiques importantes : les relations entre dimensions, et la question des couleurs. L'analyse mathématique peut également indiquer des directions de recherche que l'artiste n'a plus le droit de ne pas explorer sauf à en donner des raisons explicites, car dégagant des perspectives nouvelles à l'esprit, il ne peut, tant que ses forces sont vives, ne pas les parcourir et s'arrêter en route.

Cela concerne les dimensions supérieures à trois et les dimensions non-entières, les objets mathématiques singuliers appelés surfaces non-orientables comme le ruban de Möbius, la bouteille de Klein, les surfaces de Boy, de Roman (ou de Steiner) ...

A son tour, l'œuvre de Charvolen peut, soit poser des problèmes mathématiques nouveaux liés par exemple au choix des frontières, soit donner du sens à certains problèmes en cours d'étude comme le problème de Shephard⁵ ou les problèmes de reconstruction, soit interroger sur les opérations mathématiques effectuées par le cerveau pour reconstituer le monde réel à partir d'images formées sur la rétine.

En raison de la longueur forcément limitée de cet article je serai amené à développer certaines parties au détriment d'autres que je ne ferai qu'évoquer. Je suis certain que le lecteur, après avoir pris connaissance des quelques réflexions préliminaires que j'expose ici sera vite convaincu que le rapport entre la mathématique et l'œuvre de Charvolen, bien plus important qu'il n'y paraît au premier abord ne peut qu'être fécond pour l'une et pour l'autre, pour peu qu'il lui consacre du temps et de l'intelligence.

La problématique de Charvolen

Rappelons ce que dit Jean Petitot⁶ de l'œuvre de Charvolen :

« C'est un lieu commun que de rappeler que la peinture moderne s'est constituée à la Renaissance à travers la conquête des outils de géométrie projective (« la dolce prospettiva ») qui permettait de construire une représentation tridimensionnelle exacte de l'espace. C'est dans la simulation des structures architecturales que ces principes constructifs se manifestent avec plus de force. La toile peinte se trouve alors instituée comme support matériel d'une idéalité, l'idéalité de l'espace de la géométrie du corps... Ce n'est pas le lieu de développer ici la façon dont les techniques informatiques d'images de synthèse sont les héritières des techniques de la Renaissance. Disons simplement qu'il s'agit dans les deux cas de représenter dans un dispositif matériel (toile + peintre/écran + ordinateur) possédant une interface 2D (toile/écran) la géométrie objective idéale du monde.

C'est cette tradition extrêmement prégnante que Max Charvolen a réussi à inverser à partir d'une expérience de la toile comme support brut. La reconquête d'un rapport « toile 2D/espace 3D » à partir de ce degré zéro de la matérialité est certainement une réussite remarquable.

[...]

³ M. Charvolen, *Les portulans de l'immédiat*, « Quelques cm² de repères », p. 101-107.

⁴ Une œuvre de Charvolen, Editions Muntaner, 2001.

⁵ M. Bern, E. Demaine, D. Eppstein, and E. Kuo, "Ununfoldable polyhedra", in *Proc. 11th Canadian Conference on Computational Geometry*, 1999, p. 13-16.

⁶ J. Petitot, *Les portulans de l'immédiat*, « Le corps propre de la toile », p. 83-93.

- en devenant matrice et empreinte 3D la toile inverse son rapport naturel au bâti. Elle devient elle-même modèle. Ce n'est plus un espace 3D qui se trouve représenté sur un support 2D mais le support 2D lui-même qui se trouve moulé sur la structure 3D.
- du coup, le collapse dimensionnel 3D \rightarrow 2D n'est plus la représentation géométrique d'une projection optique idéale mais l'acte de mise à plat du support lui-même.
- par conséquent, les pratiques matérialistes anti-figuratives... se trouvent finalisées par une reprise tout à fait originale de la problématique géométrico-projective fondamentale du passage d'une structure 3D à une structure 2D. »

Si j'ai longuement cité ici Jean Petitot, c'est qu'il définit très précisément l'apport de Charvolen dans ce qui semble être depuis des siècles une des problématiques fondamentales de la peinture : représenter en deux dimensions (2D) un monde en trois dimensions (3D).

Toutefois l'œuvre de Charvolen s'inscrit dans un paradigme bien plus général qui n'apparaît pas au premier abord mais dont on peut énoncer ainsi la problématique principale : *représenter en dimension n un objet de dimension p , p étant supérieur à n (en général $p = n + 1$ ou $n + 2$).*

Dimensions mathématiques

Pour le lecteur qui n'est pas familier avec la notion mathématique de dimension, mais sans entrer dans les détails d'une rigueur formelle inutile pour lui, je vais donner quelques exemples. Toutefois auparavant, je voudrais préciser que dans tout cet article *dimension* n'est jamais utilisé dans le sens de *taille* : un point est considéré par les mathématiciens comme un objet de dimension 0. Une ligne droite (ou un segment de droite) comme un objet de dimension 1. Par extension, une ligne brisée ou une ligne courbe est aussi de dimension 1. Un plan, une figure plane (carré, triangle, disque,...) est un objet de dimension 2. On peut généralement donner un nom différent à ces deux dimensions (longueur, largeur par exemple).

L'espace dans lequel nous vivons et dans lequel on peut définir une longueur, une largeur, une hauteur est de dimension 3. Les objets matériels (cube, boule,...) sont aussi de dimension 3.

On cite généralement la théorie de la relativité restreinte élaborée par A. Einstein pour évoquer une « espace-temps » de dimension 4. Les quatre dimensions étant les trois dimensions d'espace auxquelles s'ajoute la dimension « temps ». Mais les mathématiciens n'ont pas besoin de donner une dénomination physique aux dimensions pour admettre leur existence. Dans un espace de dimension 4, on peut définir l'analogue d'un cube en dimension 3 que l'on appelle généralement « hypercube », comme le cube en dimension 3 est l'analogue du carré en dimension 2.

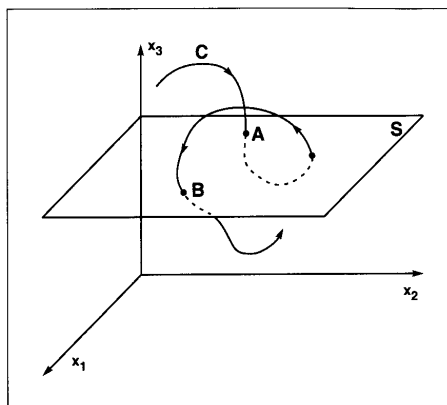


Fig. 1. (d'après [1]). Une application de Poincaré dérivée d'une équation différentielle. L'application de Poincaré G est définie pour coder les percements vers le bas du plan S par les courbes solutions C de l'équation différentielle de telle façon que $G(A) = B$ et ainsi de suite.

Rien n'empêche de généraliser à l'infini cette notion de dimension dans des espaces abstraits et une grande partie de la géométrie ou de l'analyse mathématique a pour support des espaces de dimension quelconque voire infinie.

Il est bien entendu très difficile de se représenter les objets de ces espaces et d'étudier leurs propriétés. Un des procédés assez souvent utilisé est d'effectuer des « projections » d'un espace de dimension n sur un espace de dimension $n-1$ (par exemple de 4 sur 3 ou de 3 sur 2) en espérant garder une partie des propriétés mathématiques de l'objet initial dans sa projection plus simple à étudier. Certaines de ces projections peuvent être liées à des projections de type « perspective » (cavalière ou autre) ; d'autres sont plus adaptées à des problèmes mathématiques particuliers comme celle définie au début du XX^{ème} siècle par H. Poincaré pour l'étude qualitative des équations différentielles [1]. (fig. 1).

L'utilisation du bord par Charvolen

La « projection » (je garde ici les guillemets car ce n'est pas à strictement parler une projection mathématique, mais j'emploie ce terme dans le sens étendu de restriction du nombre de dimensions) dont se sert intuitivement Charvolen est basée sur l'utilisation du ou des bords d'un objet de dimension n qui sont forcément de dimension $n-1$ (cf. L. Pottier « ...si on admet que seule la *surface* du polyèdre nous intéresse (c'est la position de Max Charvolen). La surface d'un polyèdre est constituée de faces, en nombre fini, qui sont elles-mêmes des polygones. Chacun de ces polygones étant collé à d'autres par une de ses arêtes, pour constituer la surface du polyèdre », ou J.-M. Lévy-Leblond⁷ :

« *Il me faut décoller ce revêtement, et le mettre à plat. Pas de procédé préétabli pour découper ce calque du réel : une infinité de possibilités s'offrent ... à l'artiste pour tracer les lignes de coupe qui lui permettront de rectifier sa surface gauche, si l'on m'accorde, au-delà de sa pédanterie, cet évocateur langage mathématique* »).

On peut résumer dans un tableau un exemple de fonctionnement de cette méthode pour des objets mathématiques simples de la famille du carré :

Dim. de l'objet	Nom	Bord	Dim. du bord
1	Segment de droite	Point	0
2	Carré	Segment de droite	1
3	Cube	Face carrée	2
4	Hypercube	Cube	3

Tab. 1. « La projection de Charvolen » suivant différentes dimensions.

⁷ J.-M. Lévy-Leblond, Une œuvre de Charvolen, « Le décollage », Editions Muntaner, 2001, p. 71-73.

Si d'aventure Max Charvolen mettait à plat un cube (comme il l'a fait dans la réalité pour un marteau par exemple (figure 2), mais pour un mathématicien le cube est un objet modèle plus simple à manipuler), il collerait de la toile sur chacune des six faces du cube, puis il la décollerait en la découpant suivant les bords des bords c'est-à-dire les arêtes (cf. L. Pottier : « Il appelle « mise à plat » une immersion de la surface d'un polyèdre qui satisfait ces contraintes. Dans le cas d'un cube par exemple un « T » de six carrés (quatre en hauteur, et un de chaque côté). Ce patron est bien connu des écoliers qui construisent un cube en carton. D'autres solutions sont possibles, comme une croix, un zigzag, etc. »).



Fig. 2. Charvolen, *Marteau* (1984).

Dans le cas d'un carré, la « projection » par Charvolen revient à en « arracher » les segments de droite qui en forment les bords (mais on doit admettre ici une certaine épaisseur du bord).

La mise à plat d'un cube (d'un marteau, de chaises, d'escaliers, ...) relève du passage 3D → 2D, qui est la partie majeure de l'œuvre que nous étudions (cf. M. Charvolen³ : « En 1979, je cesse de me servir des limites de la toile comme marques de la limite de la peinture et je les remplace par ce à quoi le corps peut se heurter dans l'espace bâti (angles de mur, sol, plafond...). C'est le début de la période actuelle »), allant de 1979 à nos jours.

La « projection de Charvolen » d'un carré sur ses bords (segments de droite) relève du passage 2D → 1D, qui précède cette période et dure une dizaine d'années (1969 – 1979). La figure 3 (œuvre réalisée en 1969) représente de façon caractéristique cette projection particulière (qui est appliquée deux fois de suite dans cette œuvre).

Ainsi une des composantes de l'unité sous-jacente de l'œuvre de Charvolen au cours de ces trente-cinq dernières années est *l'utilisation du bord comme outil de projection* d'abord pendant dix ou douze ans en dimension 2, puis pendant vingt-trois ans en dimension 3.

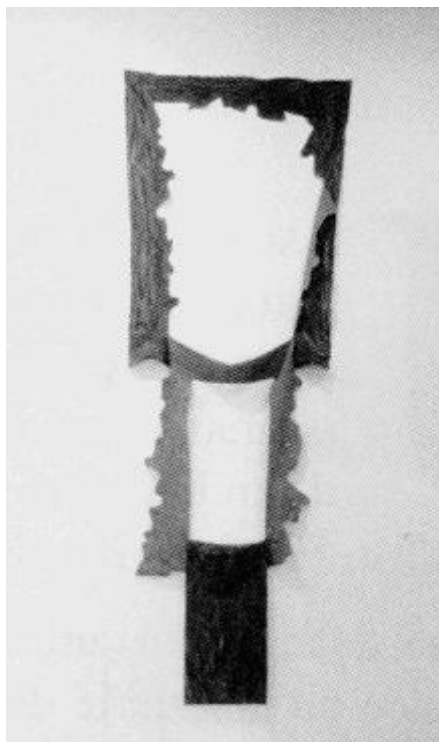


Fig. 3. « Projection de Charvolen » du carré vers ses bords (1969).

2. Quelles perspectives nouvelles ?

Cette première analyse mathématique va permettre de dégager quelques perspectives nouvelles qui pourraient être explorées par l'artiste. C'est en levant certaines restrictions comme l'utilisation de trois dimensions d'espace, de dimensions entières, ou de surfaces orientées qu'elles vont apparaître tout naturellement.

La « projection de Charvolen » en dimension 4

En indiquant ci-dessus qu'il y a des directions de recherche que l'artiste n'a plus le droit de ne pas explorer sauf à en donner des raisons explicites, je pensais en premier lieu à la « projection de Charvolen » en dimension supérieure à 3, c'est-à-dire à l'exploration du passage $4D \rightarrow 3D$. Si l'on reprend la dernière ligne du tableau 1, il apparaît que quelques indications sur la nature et les propriétés de l'hypercube doivent constituer les prolégomènes de cette exploration.

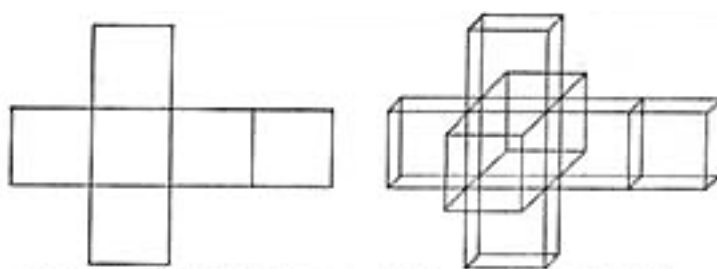


Fig. 4. Six carrés peuvent être recollés pour former un cube, huit cubes peuvent être recollés pour former un hypercube.

La figure 4 indique par analogie avec le patron du cube sur un plan ce que peut être un hypercube en montrant le « patron » d'un hypercube de dimension 4 dans l'espace de dimension 3 (la dénomination hypercube n'est pas utilisée uniquement pour la dimension 4 mais également pour des dimensions supérieures comme nous allons le voir).

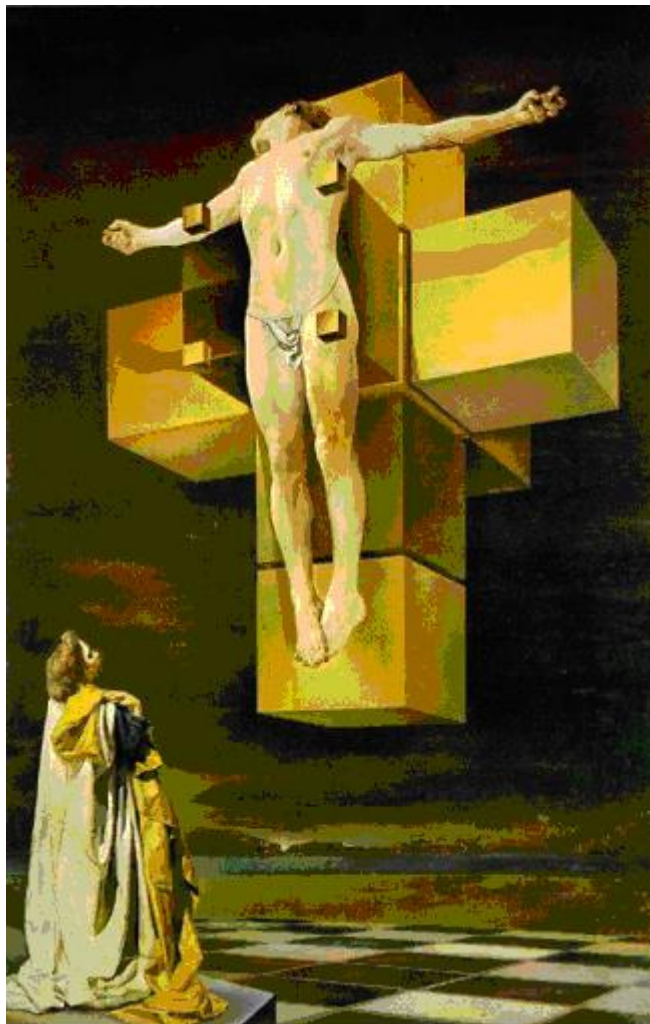


Fig. 5. Salvador Dali, *Corpus Hypercubicus*, 1955.

Salvador Dali, en 1955, a merveilleusement utilisé ce patron d'hypercube, semblable à une croix copte, dans son tableau *Corpus Hypercubicus* (figure 5).

Les bords de cet hypercube de dimension 4 sont donc des cubes de dimension 3. Bien entendu il est quasi impossible de représenter le recollement de ces cubes qui forme l'hypercube.

La projection de Charvolen ne peut sans doute pas être utilisée pour le passage $4D \rightarrow 3D$ de la même façon que lors des « mises à plat » du cube (passage $3D \rightarrow 2D$), car les bords de l'hypercube qui sont des cubes ne peuvent pas être fabriqués facilement avec de la toile (notons toutefois⁸ l'utilisation de toile et de colle par l'artiste pour obtenir des objets tridimensionnels). Cependant ce passage de la dimension 4 à la dimension 3 (de l'hypervolume au volume), cette « mise en volume » qui reste à inventer est un prolongement

⁸ R. Monticelli, « Tentative de mise en chrysalide littéraire d'une pelle à ordure », Théâtre Comœdia, Aubagne, 1992.

naturel que le peintre ne pourra pas éviter, de ses deux longues périodes de recherche qui ont été marquées par l'exploration du passage 2D → 1D, puis de celui 3D → 2D.

La « cascade » des dimensions

L'œuvre de Charvolen, dans sa recherche de correspondance entre dimensions, est cependant plus complexe que ce je mets en exergue par cette première analyse. A regarder de plus près l'évolution de l'œuvre de l'artiste telle qu'elle s'exprime dans ses deux dernières expositions (« Coups de sonde » à Malaussène et « Coups de sonde (deux) » à Marseille en 2002) on voit apparaître un nouvel outil : *la réitération de la projection*. Charvolen utilise le bord de polyèdres (polygones) puis le bord du bord (arêtes) qu'il appelle « coups de sonde » avec bien entendu une petite liberté qui consiste à garder un peu d'épaisseur pour les arêtes puisqu'il ne s'agit pas d'œuvre dessinée mais d'œuvre construite par arrachage de toile.

Plus exactement l'artiste mélange dans son travail l'utilisation de sa projection et de sa projection réitérée, gardant polygones et arêtes. Il s'intéresse ainsi aux projections ou aux « correspondances » entre plusieurs dimensions. Au lieu de se cantonner au passages d'une dimension à une autre (3D → 2D et 2D → 1D), il met en jeu la « cascade » de projections 3D → 2D → 1D.

Cette voie de recherche, qui peut être étendue par réitérations multiples (le bord du bord du bord ...) est essentielle pour l'étude du passage 4D → 3D → 2D et peut ainsi donner une solution aux mises en volumes 4D → 3D en les « aplatissant » en dimension 2.

Nous rentrons dans une recherche d'une très grande complexité.

Reprenons et complétons le Tableau 1

		Projection		Projection réitérée	
Dim. de l'objet	Nom	Bord	Dim. du bord	Bord du bord	Dim. du bord du bord
1	Segment de droite	Point	0		
2	Carré	Segment de droite	1	Point	0
3	Cube	Face carrée	2	Segment de droite	1
4	Hypercube	Cube	3	Face carrée	2

Tab. 2. « La projection de Charvolen » et sa réitération suivant différentes dimensions.

Ceci nous permet alors de relier le travail de Charvolen à celui de M. Mohr, un artiste né en 1938 en Allemagne, qui à partir de 1977 a commencé à décrire l'hypercube de dimension 4 en peignant certaines de ses faces et de ses arêtes, c'est-à-dire en utilisant une projection de Charvolen itérée deux et trois fois (figure 6) : hypercube → cube → carré → segment de droite.

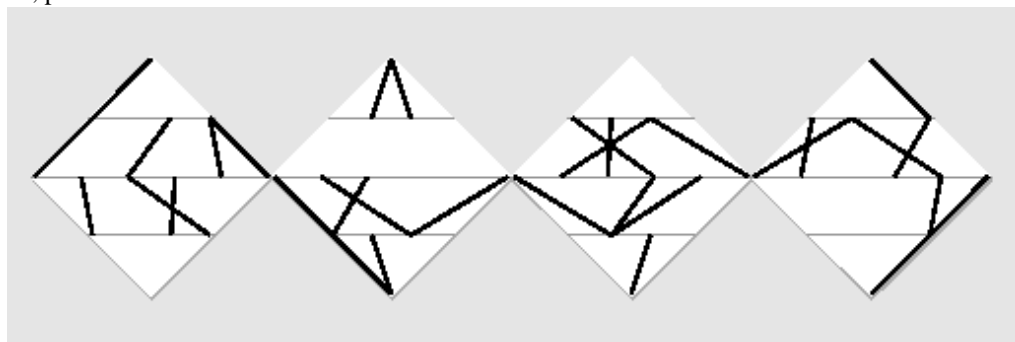


Fig. 6. Manfred Mohr, Dimensions I, 1978 –1980,
Faces et arêtes d'un hypercube de dimension 4.

De 1986 à 1989, généralisant ce procédé, M. Mohr étudie les hypercubes de dimension 5 et 6 (figure 7).

Les productions de M. Mohr, pour intéressantes qu'elles soient, se restreignent à une utilisation classique de la toile peinte. Si je milite ici pour que Max Charvolen s'empare complètement de l'étude des hypercubes, c'est que je suis convaincu que l'utilisation de la toile à sa façon peut et doit apporter bien davantage à cette étude.

« Mises à plat » en dimensions fractales

Dans l'esprit torturé des mathématiciens, l'idée que l'on puisse construire des espaces de dimension 1, 2, 3, 4, ... (c'est-à-dire des espaces de dimensions entières), ne pouvait suffire à satisfaire leur curiosité. De même qu'à côté des nombres entiers, les civilisations égyptienne, grecque et indienne ont petit à petit introduit des fractions (nombres rationnels) puis pour la grecque des nombres irrationnels, les mathématiciens contemporains ont introduit des objets particuliers ayant des dimensions non entières. L'honneur de l'invention dans les années 1960-70 de ces objets appelés objets « fractals » revient au français B. Mandelbrot [2].

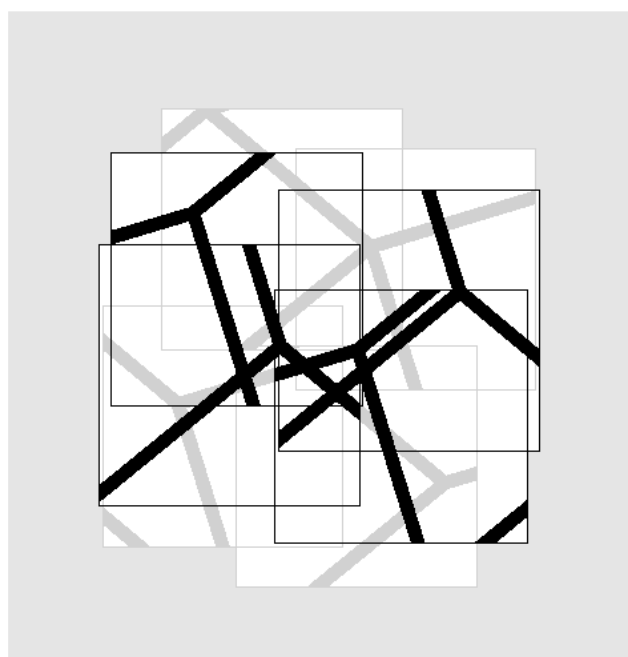


Fig. 7. Manfred Mohr, Dimensions II, 1986 –1989,
Faces et arêtes d'un hypercube de dimension 5.

Ces objets sont depuis une trentaine d'années de plus en plus utilisés dans la modélisation de phénomènes physiques réalistes (comme la percolation d'un liquide au travers d'une roche poreuse). Je ne donnerai ici qu'un seul exemple d'objet fractal : « l'éponge de Sierpinsky » (figure 8) qui a une dimension comprise entre 2 et 3 (égale à 2.72683), c'est-à-dire que c'est un objet intermédiaire entre un polygone (de dimension 2) et un polyèdre (de dimension 3). On l'obtient en enlevant à un cube plein initial, 7 petits cubes intérieurs identiques disposés en croix copte, dont l'arête de chacun a une longueur égale au tiers de l'arête du cube initial (tout autre fraction inférieure à un est autorisée) et en répétant à l'infini ce procédé.

Libéré de la contrainte de la dimension entière comme support initial de la toile collée, on peut alors se demander ce que peut donner une « projection de Charvolen » de cet objet mathématique et l'on a envie d'inviter l'artiste à explorer cette voie dont on peut cependant imaginer le départ. Une première idée naïve d'une « mise à plat » de l'éponge de Sierpinsky vient facilement à l'esprit si l'on imagine qu'on peut se limiter à une approximation grossière de cette éponge, en ne considérant que les cavités obtenues, une fois enlevés les cubes centraux. On recouvre alors de toile (y compris à l'intérieur) ce « cube évidé », et après avoir peint la toile, on la décolle. Mais le regard de Charvolen serait, s'il s'intéressait à cet objet, bien différent sans doute.

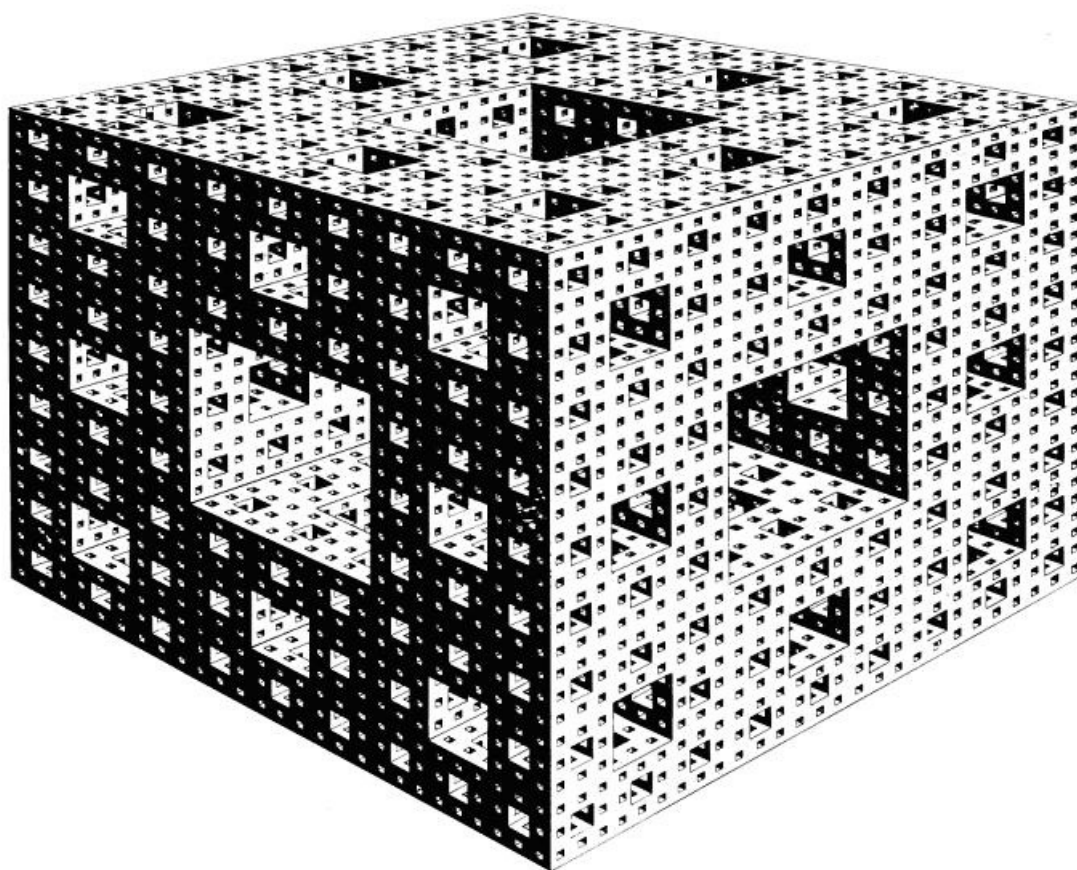


Fig. 8. L'éponge de Sierpinski d'après [2].
Box-counting dimension $d = \ln 20 / \ln 3 = 2.72683$.

Bien entendu, l'éponge de Sierpinsky n'est qu'un objet prototypique des objets fractals, comme le cube est prototypique des volumes. Dès que l'on considère un marteau ou une

chaise qui ne sont que des assemblages de polyèdres, leur mise à plat devient bien plus redoutable. Les objets fractals pour lesquels la « projection de Charvolen » devient plus intéressante encore sont sans doute ceux constitués par des assemblages de polyèdres fractaux. La Tour Eiffel peut en constituer un exemple imparfait mais parlant.

Si je propose cette voie de recherche sur des objets mathématiques issus de spéculations théoriques, c'est qu'en réalité elle pourrait également permettre de mieux approfondir ce qu'on trouve en prémisses dans certaines « mises à plat ».

La notion de dimension fractale que j'aborde dans cet article et qui peut paraître très abstraite dans la présentation forcément succincte de ce paragraphe est essentielle dans l'œuvre de Charvolen. En effet l'idée qui sous-tend son introduction par B. Mandelbrot est la suivante : les objets fractals donnent une meilleure représentation des objets naturels que les objets géométriques habituels (polygones, polyèdres) trop idéalisés (rencontre-t-on vraiment une ligne droite ou un cercle dans la nature ?). On dit souvent, pour les caractériser, que les fractals sont des ensembles « auto-similaires », c'est-à-dire que, regardés à différentes échelles, ils apparaissent semblables. L'exemple le plus fameux étant celui des côtes de la Bretagne qui apparaissent toujours aussi découpées qu'on les regarde sur une carte de France ou sur une carte régionale ou même à l'échelle d'une carte communale.



Fig. 9. Charvolen, Au Cannel : palier, escalier, rampe, 1993-1994.

Autre exemple, un mur de pierres sèches, a pour Mandelbrot les mêmes caractéristiques qu'un ensemble fractal, chaque pierre ayant des anfractuosités possédant elles-mêmes d'autres cavités et ainsi de suite.

Si l'on regarde la mise à plat « Au Cannel : palier, escalier, rampe » réalisée en 1993 par Charvolen (figure 9), on constate que la mise à plat de l'ensemble escalier-rampe représente une vision plus fine que la simple mise à plat de l'escalier. En première approximation, l'escalier était parfaitement identifiable sans sa rampe. C'est seulement dans un deuxième regard plus précis qu'apparaît la rampe. Un troisième regard plus fin encore pourrait s'intéresser aux détails de la rampe pour un escalier possédant une rampe moulurée.

Cette analyse est également un peu ébauchée dans la mise à plat « Institut français de Naples : façade » (1989).

Il y a bien dans certaines mises à plat déjà réalisées les prémisses de mises à plat de fractals. Ainsi l'apport de la mathématique dans l'œuvre de Charvolen peut également consister en l'apport d'outils mathématiques nouveaux pour mieux approfondir les mises à plat.

« Mises à plat » de surfaces non orientables

Jusqu'ici, tous les supports utilisés pour coller une toile avant d'en tirer une « mise à plat » sont constitués d'objets que les mathématiciens appellent « surfaces orientables ». Une autre voie de recherche que l'on aimerait voir défricher par Max Charvolen concerne les « mises à plat » d'objets mathématiques singuliers appelés surfaces non-orientables comme le ruban de Möbius, la bouteille de Klein, les surfaces de Boy, de Roman (ou de Steiner), etc.

La plus connue et la plus simple de ces surfaces s'appelle le ruban de Möbius. Pour la construire, il suffit de prendre une bande de papier de longueur finie, de lui donner une torsion d'un demi-tour autour de son axe de symétrie, puis de la refermer sur elle-même en recollant les bouts. Une fourmi marchant sur une face de ce ruban ne peut jamais s'arrêter : le ruban ne possède qu'une seule face. Si la fourmi au lieu de suivre le milieu du ruban, se promène sur un bord elle ne va jamais s'arrêter non plus : le ruban n'a qu'un seul bord. Les propriétés liées à l'orientation de ce bord justifient l'appellation de surface non-orientable.

On peut imaginer alors « d'emmailloter » ce ruban de Möbius dans une toile, puis de découper cette toile suivant une courbe qui suit le bord presque toujours, sauf une fois où elle coupe le ruban en biais, et enfin de « mettre à plat » cette toile. La peinture de la toile en place peut faire l'objet d'un conflit dont la résolution doit sans doute donner des résultats intéressants du point de vue esthétique.

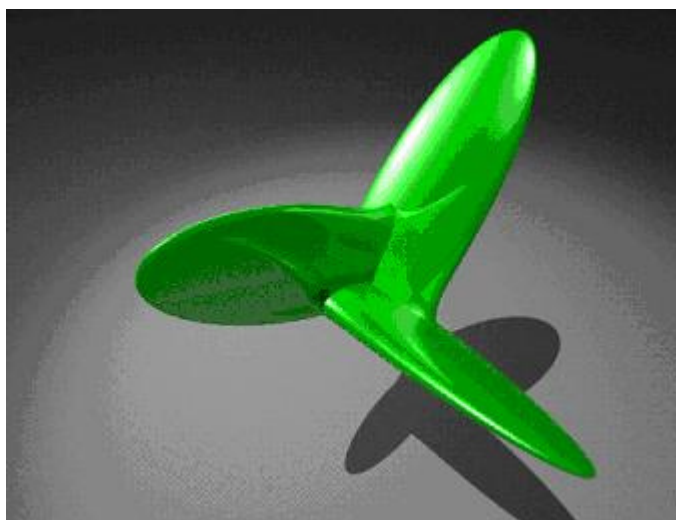


Fig. 10. Une surface de Boy. Il est à noter que l'on admet une interpénétration des surfaces avec elles-mêmes.

Il existe d'autres surfaces non-orientables comme les fameuses surfaces de Boy (figure 10) découvertes en 1902 et qui sont au ruban de Möbius, ce qu'est le cube au carré. Leur « mises à plat » doit poser des problèmes pratiques et théoriques redoutables en raison de l'interpénétration des surfaces. Leur résolution, qui pourrait faire appel à des « toiles » de nature différentes (coton, film transparent), devrait sûrement faire progresser la « projection de Charvolen ». Mais c'est ici seulement l'instinct du mathématicien qui parle.

3. Le rôle de la couleur

Quittons maintenant l'intrication entre « mises à plat » et dimensions géométriques que nous avons analysée de façon approfondie dans les deux parties précédentes, pour nous intéresser au rôle de la couleur dans l'œuvre de Max Charvolen. Toutefois, par manque de place, je ne ferai qu'esquisser une seconde problématique qui va se dégager.

Les différentes « mises à plat » qui composent cette œuvre font appel à un nombre limité de couleurs. Raphaël Monticelli en expose les raisons⁹ :

« La pigmentation, le choix des couleurs est toujours en rapport avec l'état du lieu ou de l'objet. Ici, chaque couleur correspond à un plan différent du volume, de la matrice, le rouge ici par exemple, ... marque tous les retours du volume, tous les gris, les plans de surface de la façade, le jaune, le retour de droite ».

Comme dans chaque « mise à plat » ces plans sont en nombre limité, le nombre de couleurs l'est aussi.

Cette utilisation d'un nombre restreint de couleurs se perçoit encore mieux dans les études de « mise à plat » où l'on voit que l'utilisation de la couleur est encore plus importante dans les esquisses en dimension deux que sur le volume initialement choisi (figure 11).



Fig. 11. Charvolen, *Le petit escalier en vis*, 2001.

⁹ R. Monticelli, *Les portulans de l'immédiat*, p. 55-56.

L'architecte qu'a été Charvolen se sert des différentes couleurs pour repérer les composantes de la toile découpée¹⁰ :

« Orange : mur de gauche (en montant)

Vert : mur de face

Noir : tableau de porte

Rouge : tableau de la porte

Rose : mur d'échiffre

Colle non colorée, traces de passage et de travail : escalier »

Il peut sembler étonnant que l'on puisse mener une réflexion mathématique sur un choix de couleurs. En effet les figures utilisées par les mathématiciens pour leurs démonstrations sont le plus souvent simplement tracées en noir, même si pour des raisons pédagogiques, les enseignants de mathématiques utilisent des craies de couleur sur le tableau noir. La valeur d'une démonstration ne dépend pas du choix de la couleur de la figure.

Aussi n'est-ce pas vers une quelconque détermination mathématique des couleurs utilisées que j'inclinerai ma réflexion. C'est, en revanche, sur le nombre de couleurs utilisées qu'il me semble intéressant de s'interroger.

Une fois exposée sur un support, une « mise à plat » a les mêmes caractéristiques qu'une carte de géographie avec des recouvrements de parties de toile sur d'autres. Dans : « Vertiges d'une chaise », six couleurs sont utilisées. Raphaël Monticelli indique :

« Couleurs (des surfaces) : leur distribution permet de différencier la situation des plans du volume.

- Le choix d'une couleur pour distinguer un plan est aléatoire, (i.e. n'est pas déterminé par la « qualité » du plan, ou sa position par rapport au regardeur).
- La distribution des couleurs est aléatoire. Seule a de sens la différenciation des plans qu'elle permet de visualiser. Le nombre des distributions possibles pour une même mise à plat est de 720. »

Interrogé, Max Charvolen s'explique sur le choix de six couleurs en indiquant qu'il y a trois dimensions d'espace et que pour chacune on utilise deux couleurs, une au-delà et une en-deçà d'une origine arbitraire sur l'axe de chaque dimension.

Depuis au moins trois siècles, il est bien connu des imprimeurs d'atlas de géographie que quatre couleurs suffisent à colorier n'importe quelle carte de géographie sans que deux pays frontaliers soient de la même couleur. Ce théorème conjecturé en 1852 par F. Guthrie [3, 4] n'a été démontré qu'en 1976 par K. Appel et W. Haken. Sa démonstration qui fait appel à un nouveau type de preuve en mathématiques, la démonstration assistée par ordinateur, est toutefois encore en discussion dans la communauté scientifique en raison des difficultés de vérification.

On peut alors appliquer le théorème des quatre couleurs aux « mises à plat » de Charvolen et être ainsi certain que quatre couleurs suffisent pour séparer chacun des plans.

Il reste que l'affirmation que quatre couleurs suffisent aux : « Vertiges d'une chaise », ceci ayant pour effet de diminuer sensiblement le nombre de distributions possibles, ne donne aucune indication sur la façon d'attribuer une couleur à chacun des plans. En outre, il est évident que l'on ne peut pas attribuer de façon fixe une couleur à un plan donné sur la chaise, car suivant la mise à plat choisie, certaines parties ayant la même couleur peuvent se recouvrir.

¹⁰ M. Charvolen, Arles – Pièces détachées, *Le petit escalier en vis*, Musée Réattu, 2001, p. 18-19.

Il y a là tout un domaine de recherche qui s'ouvre : « Comment bien choisir les couleurs appliquées sur la toile avant la « mise à plat », afin de distinguer les plans ? Doit-on faire les esquisses avant la réalisation, comme le fait de façon systématique L. Pottier, grâce à la simulation numérique ? »

En dehors de toute résolution théorique générale de cette problématique ainsi explicitement formulée, on a quand même l'impression que c'est une contrainte qui pèse de façon inconsciente sur Max Charvolen, chaque fois qu'il commence une œuvre (même si son choix peut être déterminé par d'autres raisons conscientes), puisqu'on trouve dans chacune de ses réalisations ce souci d'économie du nombre de couleurs qui donne une grande unité à son travail.

L'apport des mathématiques à l'œuvre de Charvolen est conséquent, elles peuvent l'aider à mieux formuler ses contraintes et à dégager les deux problématiques principales : celle de la projection sur un espace de dimension inférieure et celle de la minimisation du nombre de couleurs.

4. La mathématique et Charvolen

Bord dimensionnel et bord frontière

Il me semble important que le rapport entre la mathématique et l'œuvre de Charvolen soit examiné dans un mouvement de va-et-vient dont nous venons de parcourir l'aller. Il est temps de songer au retour : « Que peut apporter l'œuvre de Charvolen à la mathématique ? ». C'est ce que je vais faire en menant cette réflexion sous trois angles différents.

Tout d'abord, il saute aux yeux du mathématicien que les lignes de découpe de chaque « mise à plat » ne sont pas toutes de même nature : il y a les lignes de découpe qui permettent d'aplatir le polyèdre mis à plat (arêtes, mais également génératrices de cylindre dans le cas des barreaux d'une rampe) et il y a les lignes de découpe qui marquent le bord de la toile ou le bord des « sondes ». Ces dernières sont choisies arbitrairement par l'artiste car elle ne sont pas imposées par le volume ; elles sont choisies avec l'idée de « penser aux limites »¹¹ :

*« penser aux limites,
limite où arrêter la pièce,
limite où le corps n'atteint plus,
limite du corps statique,
limite du corps qui se déplace en travaillant,
...
limite des bras,
limite du dedans/dehors,
limite du dehors/dedans,
limite du dedans/dedans,
limite des fragments du corps utilisateur,
limite du corps utilisant,
limite du lieu et de la fin du lieu,
limite de procédures différentes dans une même pièce.*

*...
Limiter d'un geste à distance ce que seront les dimensions couvertes,
Faire correspondre ces limites à une nécessité »*

¹¹ M. Charvolen, *Une œuvre de Charvolen*, « Atelier nocturne 1999 – 2000 », p. 91-93.

Ce qui frappe chez l'artiste c'est, ainsi que je l'ai déjà indiqué, *le travail du bord* ; le bord ou le bord du bord, par la projection choisie, que je nommerai ici : « *bord dimensionnel* » et s'y opposant, le « *bord frontière* » (pour les différencier, l'artiste impose au bord frontière des échancrures sur tout son long).

Il y aurait tout un travail de recherche mathématique à initier à partir du choix des frontières dans les mises à plat : « Le *bord frontière* constituant une sorte d'ombre portée de l'artiste sur un volume, ne pourrait-on pas en définir le contour de façon algorithmique ? »

C'est le domaine de la *géométrie projective* qui est convoqué ici, domaine très ardu des mathématiques créé par G. Monge il y a deux cents ans.

Certains effets guidés par l'esthétique pourraient également constituer d'épineux problèmes. Dans : « Le départ de l'escalier d'accès à l'étage » (2001)¹², le *bord frontière* entourant complètement le *bord dimensionnel*, ne pourrait-on pas rechercher les conditions d'équidistance entre les deux, de façon que l'un soit l'homothétique de l'autre ?

Ne pourrait-on pas imaginer un *bord frontière* d'un objet qui soit le *bord dimensionnel* d'un autre objet mis-à-plat ? Il y aurait alors une double dualité entre un *objet A* possédant un *bord dimensionnel A* et un *bord frontière A*, et un *objet B* ayant un *bord dimensionnel B* et un *bord frontière B*, définie par les équations :

bord dimensionnel B = bord frontière A

bord dimensionnel A = bord frontière B

Il apparaît alors que l'œuvre de Charvolen ne peut pas se réduire simplement au travail du bord. Il y a un degré de complexité supplémentaire qui se dégage, constitué par la relation (mathématique ?) entre le travail du bord dimensionnel et le travail du bord frontière. L'unité picturale de toute l'œuvre provient de cette nouvelle relation de dualité.

Je mets ici mathématique entre parenthèses car si dans les deux prolongements possibles que je viens de proposer, cette relation est bien d'ordre strictement mathématique, il n'est pas interdit de penser que dans les œuvres déjà réalisées, la nature de cette relation, qui semble rester au niveau de l'inconscient, ou qui du moins n'est jamais explicitée en tant que telle par l'artiste, soit également mathématique. Ce point reste à éclaircir.

Les reconstructions et le problème de Shephard

Confronté à une « mise à plat », on a souvent le réflexe de reconstruire mentalement l'objet ou le lieu que la toile a recouvert. Sous-jacente à ce travail de reconstruction, il y a l'idée implicite que la reconstruction va conduire à un objet unique.

¹² M. Charvolen, Arles – Pièces détachées, *Départ de l'escalier d'accès à l'étage*, p. 26-27.

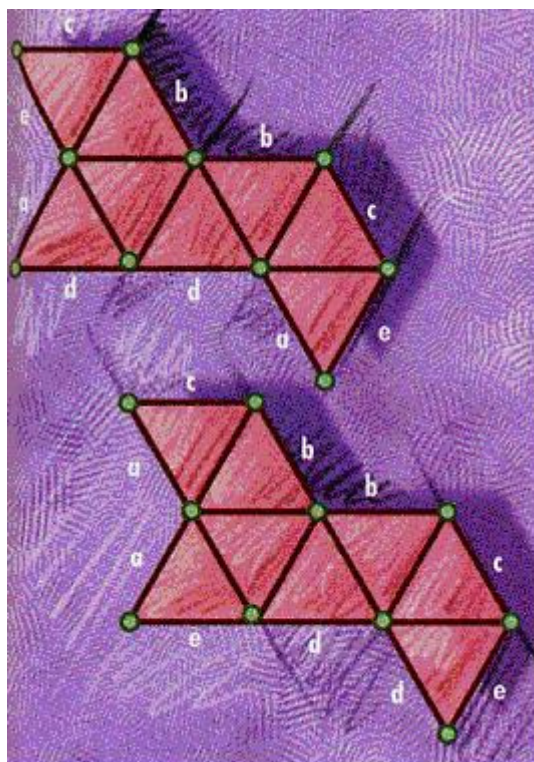


Fig. 12. Avec un patron formé de huit triangles équilatéraux, il est possible de former aussi bien un octaèdre régulier convexe ou un octaèdre non convexe.

Cependant si l'on examine ce problème en toute rigueur mathématique, il est possible de trouver des cas où l'on est conduit à deux ou plusieurs solutions [5] (figure 12). Ceci constitue un des problèmes mathématiques auxquelles le travail de Charvolen donne un sens.

Un autre problème déjà évoqué par L. Pottier¹ est le suivant : Est-il toujours possible de découper un polyèdre tridimensionnel convexe¹³ le long de certaines de ces arêtes pour que la figure obtenue, une fois dépliée sur le plan, n'ait pas de morceaux - formant les faces - qui se chevauchent ?

Le premier à avoir attiré l'attention sur ce problème facile à énoncer semble être le mathématicien britannique G.C. Shephard en 1975 (ce problème porte d'ailleurs son nom). On pense toutefois que ce problème est connu implicitement depuis les travaux du graveur A. Dürer autour des années 1500. Le lien entre mathématique et art n'est donc pas nouveau. Aucune preuve de cette conjecture n'a été apportée jusqu'à présent malgré d'intenses recherches mathématiques⁵. On sait seulement que l'hypothèse de convexité est cruciale puisqu'il existe des exemples de polyèdres non convexes pour lesquels il n'existe pas de patron sans chevauchement des faces.

Pour un polyèdre pris au hasard, la plupart des découpages ne donnent pas de patron sans chevauchement. Ainsi si la conjecture se révèle être vraie, ce sera d'autant plus remarquable que chercher des arêtes à découper pour obtenir une bonne manière de constituer le patron revient à trouver une aiguille dans une botte de foin.

Ici, comme dans le théorème des quatre couleurs, l'affirmation de l'existence d'une solution se fait souvent sans la mise en évidence de cette solution. La recherche de la solution

¹³ Un objet est convexe si pour toute paire de point le constituant, le segment qui les joint se trouve dans sa totalité à l'intérieur de l'objet.

étant déconnectée de l'affirmation de son existence, ce qui étonne souvent le non mathématicien.

Comme L. Pottier et M. Charvolen l'ont rencontré dans les « Vertiges d'une chaise »², le problème de calculer, ou au moins d'estimer le nombre de « mises à plat », se pose. Je donne à la figure 13 une page d'une publication mathématique récente concernant le nombre de façons de mettre à plat un polyèdre.

Une exploration très rapide de la littérature mathématique faite en utilisant Internet, donne des dizaines de publications très récentes dans ce domaine de recherche.

On peut également se demander si on ne peut pas recouvrir un « polycube », c'est-à-dire un assemblage de cubes identiques, par une toile qui serait peinte par un « pavage » régulier (couverte par une même figure géométrique plane appelée « pavé », comme le pavage d'un sol - voir la figure 14). O. Bodini, de l'équipe de recherche « combinatoire » du CNRS à l'université Pierre et Marie Curie, démontre que cela est possible pour tout polycube [6]. C'est également une voie de recherche que Max Charvolen pourrait explorer s'il en ressentait l'envie. Il me semble que sa vision artistique personnelle nous conduirait sans doute à d'autres problèmes de mathématiques que je ne peux pas encore imaginer.

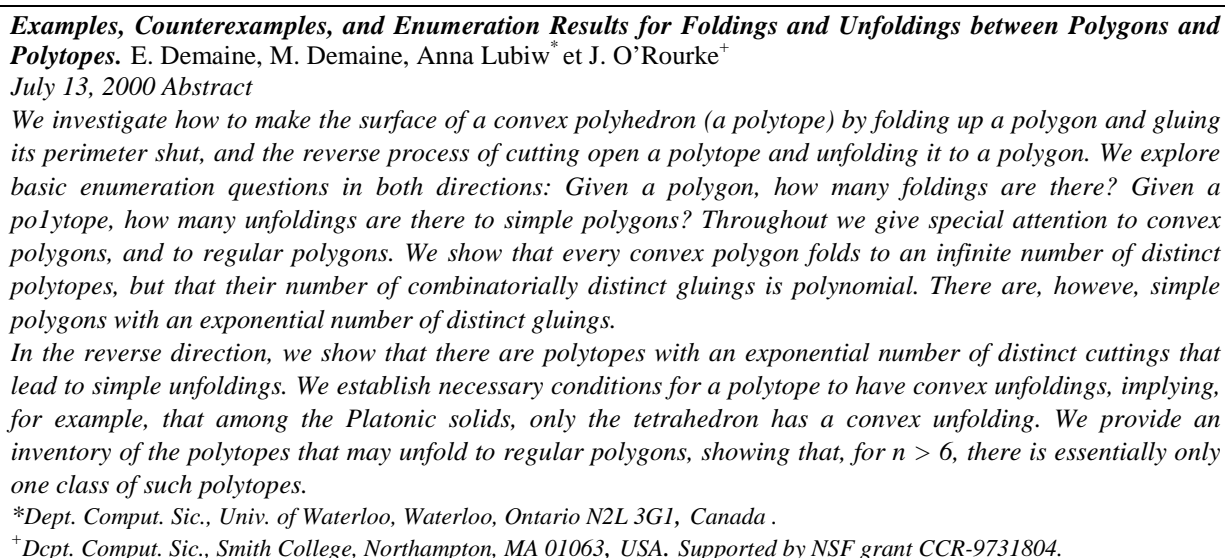


Fig. 13. Une publication mathématiques récente sur le nombre de façons de mettre à plat un polyèdre.

Les dimensions de la vision et celles de l'univers

Nous avons vu que la problématique de Charvolen consiste essentiellement dans une exploration du passage d'un espace à plusieurs dimensions à un espace de dimension moindre, par des opérations de « mise à plat » ou de « coup de sonde ». J. Petitot le rappelait en situant cette problématique dans l'histoire de la peinture.

Cependant, considérer que la difficulté de représenter l'espace en trois dimensions qui nous entoure, sur l'espace en deux dimensions d'une toile est l'essentiel de la problématique de la peinture du monde réel n'est peut-être qu'une mauvaise façon de poser le problème.

En effet le progrès des sciences cognitives nous permet aujourd'hui de penser que le traitement des images de l'espace à trois dimensions perçues par l'œil, effectué par le cerveau humain pour se situer dans son environnement, passe peut-être par une représentation à quatre dimensions des objets individualisés dans ces images [7]. Cette représentation en quatre dimensions est également utilisée pour l'interprétation automatique d'images médicales en trois dimensions [8].

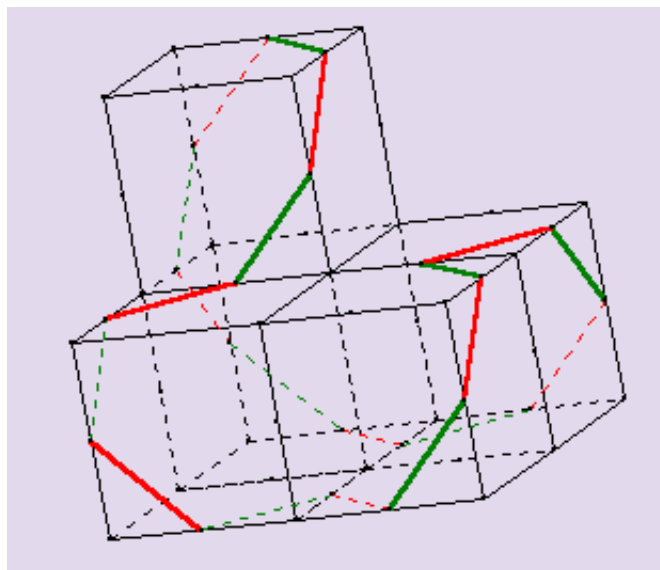


Fig. 14. Le bord d'un polycube P est pavable par dominos (d'après [7]).

Nos deux yeux nous fournissent chacun une image plane, et pourtant le cerveau reconstruit en permanence un monde en trois dimensions. C'est en se demandant comment transmettre cette faculté à l'ordinateur, pour permettre, par exemple, de doter des robots de la faculté de se mouvoir dans une pièce, que les informaticiens s'aperçoivent que les techniques intuitives ne donnent pas de résultats convaincants. Ils doivent se tourner vers des méthodes plus élaborées ; ils considèrent une courbe plane (soit par exemple, le contour de la figure d'une personne) comme la trace d'une surface de l'espace en trois dimensions sur un plan transverse. Les transformations mathématiques effectuées sur la surface se répercutent alors sur la courbe. Une propriété essentielle de ces transformations est que la courbe peut se séparer en plusieurs morceaux, même si la surface reste d'un seul tenant. Plusieurs courbes qui sur une photo sont séparées, peuvent en réalité être reliées, car elles appartiennent à une même surface, comme les contours des anneaux d'une chaîne correspondent aux contours d'éléments d'un même objet : une chaîne.

Cette méthode peut être appliquée aux objets tridimensionnels (il faut alors utiliser une hypersurface en dimension quatre).

Je suis persuadé, sans bien entendu pouvoir le justifier scientifiquement, que si l'œuvre de Charvolen nous interpelle aussi fortement, c'est qu'elle est liée d'une façon que je ne sais pas décrire toutefois, au traitement des images issues de la vision par le cerveau humain. On peut rapprocher cette intuition de celle que l'on a en considérant que la prégnance de certains tableaux de P. Mondrian sur notre regard est reliée à l'existence de certains réseaux de neurones (biologiques) relativement « universels ».

Il serait intéressant de lancer des recherches sur la raison de cette prégnance en utilisant dans un premier temps la théorie des réseaux de neurones informatiques¹⁴. Une idée de base

¹⁴ Les réseaux de neurones au sens informatique du terme (appelés aussi neurones formels) sont en réalité des modélisations mathématiques des réseaux de neurones réels, proposées dès 1942 par Mc Culloch et Pitts. Leur étude constitue actuellement un vaste champ de recherche à la frontière entre informatique théorique et mathématique. La théorie a déjà débouché sur des réalisations concrètes que nous utilisons chaque jour sans le savoir : les machines de tri du courrier reconnaissent les adresses, même si elles sont manuscrites en utilisant des réseaux de neurones ; la reconnaissance vocale par les ordinateurs (logiciels de dictée automatique, téléphones portables) en utilisent également, ainsi que les programmes de gestion de valeurs boursières etc...

Spatialisation en art et sciences humaines, sous la direction de Marcin Sobieszczanski, avec la collaboration de Céline Lacroix, Collection critique Pleine Marge dirigée par Jacqueline Chénieux-Gendron, Peeters, 2004, p. 225-253.

pourrait être de chercher quel type de réseau (à une ou plusieurs couches) réagit le mieux à ce type de production artistique, quelles relations mathématiques entre les différents neurones formels sont les plus adaptées.

Enfin on ne peut pas terminer ce rapide tour d'horizon sur les liens entre la mathématique et l'œuvre de Charvolen, sans s'interroger sur le nombre réel de dimensions de l'espace physique dans lequel nous vivons, car le travail de l'artiste, comme nous venons de le voir, nous interroge essentiellement sur la notion de dimension.

Sans entrer dans le détail de théories physiques extrêmement complexes, il faut noter que la notion de dimension est actuellement au cœur de la réflexion de plusieurs de ces théories qui cherchent à unifier la physique des particules et ont une portée cosmologique, puisqu'elles apportent leur vision particulière pour la connaissance de l'univers.

Les « théories des cordes » remettent en question l'idée intuitive que nous vivons dans un monde qui a réellement trois dimensions d'espace [9]. Elles se posent de nombreuses questions et en particulier une que nous pouvons naïvement traduire ainsi :

« L'univers visible est-il une membrane qui flotte dans un espace de dimension supérieure ? »

Pour y répondre, les physiciens proposent des modèles avec non seulement les trois dimensions d'espace usuelles (qui ont des tailles immenses, mesurées en milliards d'années lumières), mais aussi des dimensions supplémentaires qu'ils rajoutent. Ces dimensions supplémentaires pouvant être enroulées en cercles si petits (peut-être avec des rayons de seulement 0, 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 001 mètre) que nous ne les avons pas encore détectées, ou bien être plus grandes (de l'ordre de 1 millimètre) mais invisibles. Il faudrait au moins dix dimensions d'espace pour ces nouvelles théories qu'aucune expérience physique probante n'a encore validées ; elles le seront peut-être dans les vingt prochaines années.

Conclusion

Une première analyse mathématique de l'œuvre de Charvolen me semble faire émerger des invariants surprenants centrés sur des questions liées aux dimensions de l'espace physique ou d'espaces mathématiques. Ces questions sont essentielles, y compris pour la physique moderne et la cosmologie.

Le rôle important de la couleur mériterait d'être plus approfondi.

En retour des questions essentielles de mathématiques, comme le problème de Shephard ou le rôle des bords, prennent un éclairage autre, au travers du travail de l'artiste.

Il me semble essentiel d'approfondir la réflexion amorcée brièvement ici. Peut-être aura-t-elle également une influence sur les productions futures de l'artiste ?

René Lozi

Université de Nice-Sophia Antipolis, (IUFM Célestin Freinet)

Spatialisation en art et sciences humaines, sous la direction de Marcin Sobieszczanski, avec la collaboration de Céline Lacroix, Collection critique Pleine Marge dirigée par Jacqueline Chénieux-Gendron, Peeters, 2004, p. 225-253.

Références

- [1] K.T. Alligood, T.D. Sauer, J.A. Yorke, *Chaos an introduction to dynamical systems*, Springer, 1996, p. 49.
- [2] B. B. Mandelbrot, *Fractals, form, chance, and dimension*, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1977.
- [3] R. Lozi, « La preuve d'un certain chaos », *La Recherche*, n° 337, 2000, p. 24-25.
- [4] K. Appel, W. Haken, *Every planar map is four colorable*, Contemporary Math., 98, 1989.
- [5] J. Malkevitch, « Le géomètre et la paire de ciseaux », *La Recherche*, n° 1108, 2001, p. 62-63.
- [6] O. Bodini, *Approches combinatoire et algébrique de problèmes de pavage*, Thèse de doctorat, 1999.
- [7] R. Keriven, « La vision informatique du relief », *La Recherche*, n° 318, 1999, p. 36-39.
- [8] N. Ayache, G. Subsol, « Le cerveau en quatre dimension », *La Recherche*, n° 320, 1999, p. 46-49.
- [9] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, « Les dimensions cachées de l'univers », *Pour la Science*, n° 2687, 2000, p. 56-63.

Note de l'éditeur :

La Collection critique Pleine Marge est dirigée par Jacqueline Chénieux-Gendron

gendron.chenieux@wanadoo.fr